

Strahlenschutz nach Tschernobyl

Ionisierende Strahlen:

Erkenntnisse, Konzepte, Regelungen

27. Jahrestagung der Vereinigung Deutscher Strahlenschutzärzte e. V.

Strahlenschutz in Forschung und Praxis · Band XXVIII

Herausgegeben von

J. Schütz, W. Börner und O. Messerschmidt

Bearbeitet von

U. Becker

H. Drepper

K. Ernst

K. Ewen

M. Hundeiker

A. Kaul

A. M. Kellerer

W. Kemmer

F. Kossel

W. Leppin

H. J. v. Oertzen

H. D. Roedler

O. Rosenbaum

F. E. Stieve

Ch. Streffer

H. Tilkorn

S. Wagner

M. v. Websky

30 Abbildungen, 27 Tabellen



1987

Georg Thieme Verlag Stuttgart · New York

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	III
Herausgeber und Mitarbeiter	V
H. J. v. Oertzen Perspektiven des Strahlenschutzes im Rahmen des allgemeinen Umweltschutzes	1
 <u>Das akute Ereignis</u>	
A. Kaul Tschernobyl: Fakten, Maßnahmen, Konsequenzen	12
 <u>Erkenntnisse</u>	
A. M. Kellerer Zur Revision der Qualitätsfaktoren im Strahlenschutz	20
Ch. Streffer Risiko nach Strahlenexpositionen während der pränatalen Entwicklung des Menschen	34
W. Leppin Pränatale Strahlenexposition Folgerungen aus radiologischer Sicht	48
 <u>Konzepte</u>	
H. D. Roedler Forschung am Menschen mit radioaktiven Stoffen	58
A. Kaul Effektive Dosis und Konzept der Dosisbegrenzung	65
S. Wagner Neuere Entwicklungen bei Dosisbegriffen und Meßmethoden für den Strahlenschutz	78

Regelungen

F. E. Stieve	
Akzeptanz von strahlenbedingten Risiken	89
M. v. Websky	
Der Stand der Beratungen zur Novellierung der Strahlenschutzverordnung	109
W. Kemmer	
Strahlenminimierung durch Qualitätssicherung	118
U. Becker	
Novelle der Röntgenverordnung	122
K. Ewen	
Die berufliche Strahlenexposition in der Röntgendiagnostik	126
O. Rosenbaum	
Die Einstufung beruflich strahlenexponierter Personen	135
F. Kossel	
DIN-Normen und die neuen Verordnungen	138

Klinik: Strahlenfolgen an der Haut

H. Drepper	
Die Behandlung strahlengeschädigter Haut und von Tumoren auf strahlengeschädigter Haut in der Fachklinik Hornheide	150
K. Ernst	
Besonderheiten strahlengeschädigter Hände	155
M. Hundeiker	
Klinik der Strahlenfolgen an der Haut	160
H. Tilkorn und H. Drepper	
Die chirurgische Behandlung von Strahlenfolgen an der Haut und ihre Indikation	165

Albrecht M.Kellerer
Institut für Medizinische Strahlenkunde der Universität
Würzburg

Frühere Entwicklungen

In den ersten Jahrzehnten des Jahrhunderts hatte man es, soweit Strahlenschutz überhaupt berücksichtigt wurde, vor allem mit Röntgenstrahlen und γ -Strahlen zu tun. Da für beide Strahlenarten etwa gleiche biologische Wirksamkeit angenommen wurde, genügte eine gemeinsame Dosisgröße - etwa die an die Einheit Röntgen gekoppelte, der Ionendosis verwandte 'Exposure' - als Maß für die Quantität einer Bestrahlung. Es gab allerdings auch damals Hinweise darauf, daß durchdringender γ -Strahlung nicht die gleiche biologische Wirksamkeit pro Röntgen zuzuschreiben sei wie Röntgenstrahlung, und daß die Angabe einer Dosis ohne Festlegung anderer Parameter, insbesondere der zeitlichen Verteilung, wenig sinnvoll sei. Beispielsweise verteidigte Failla (1), obgleich Physiker, aus diesem Grunde die 'Erythemdosis' gegen klinische Radiologen, die das physikalische Konzept und die Einheit Röntgen vorzogen. Überlegungen zur Wertung der Strahlenqualität wurden ein wichtiges Thema des Strahlenschutzes jedoch erst, als andere Arten ionisierender Strahlen Bedeutung erlangten, und als vergleichbare Sicherheitsschranken auch für solche Strahlen einzuführen waren.

Cantril und Parker (2) schlugen 1945 vor, Strahlen nach ihrer Ionisationsdichte in Luft zu bewerten. Sie wählten bereits damals den Wichtungsfaktor von 10 für Neutronen und α -Strahlen relativ zu locker ionisierender Strahlung. Internationale Vereinbarungen in den folgenden Jahren benützten zunächst γ -Strahlung als Referenz für die Wichtungsfaktoren. Erst später bezog man sich auf Röntgenstrahlung und stellte fest, daß die biologische Wirksamkeit von γ -Strahlung dann geringer als 1 sein müsse, daß man jedoch für Zwecke des Strahlenschutzes zunächst auf diese Unterscheidung verzichten könne (siehe (3)).

Die gegenwärtig benutzten Regeln und Vereinbarungen stützen sich auf die Vorschläge der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP) aus dem Jahr 1955 (4). Der wesentliche Inhalt dieser Empfehlungen dient seitdem in den meisten westlichen Ländern als Grundlage nationaler Gesetzgebungen zum Strahlenschutz.

* Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes St.Sch.1002 durch den Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unterstützt.

Gegenwärtiger Stand der Problematik

Die hauptsächliche Bezugsgröße im Strahlenschutz ist die Äquivalentdosis, das Produkt der Energiedosis und eines Qualitätsfaktors, der unterschiedliche Werte für locker und für dichtungisierende Strahlen hat. Der Qualitätsfaktor dient als Maß für die Wirksamkeit, mit der verschiedene Strahlenarten bei kleinen Dosen schädliche stochastische Wirkungen am Menschen hervorrufen. Unter stochastischen Wirkungen versteht man vor allem Erbschäden und Strahlenkarzinogenese. Da Risiken kleiner Dosen immer nur aus Beobachtungen der Wirkung hoher Dosen auf den Menschen oder aus experimentellen Daten erschlossen werden können, muß die Festsetzung von Qualitätsfaktoren auf Extrapolationen menschlicher und tierischer Daten sowie auf indirekter Information aus zytologischen Studien beruhen. Die Synopsis der 1955 vorhandenen Information führte zu den Empfehlungen der ICRP (4), in denen der Qualitätsfaktor, $Q(L)$, als Funktion des linearen Energietransfers (LET) einer Strahlung definiert wurde (Tabelle 1).

Der Qualitätsfaktor, Q , als Funktion von LET

$L_{\infty} / (\text{keV}/\mu\text{m})$	Q
bis 3,5	1
7	2
23	5
53	10
175	20

Tabelle 1

Für ein Strahlungsfeld, das im allgemeinen aus geladenen Teilchen mit unterschiedlichem LET besteht, ist der Wert des Qualitätsfaktors durch Integration über das LET Spektrum zu ermitteln:

$$Q = \int Q(L) d(L) dL \quad (1)$$

wobei $d(L) dL$ der Anteil der Dosis im LET Bereich L bis $L+dL$ ist.

Seit etwa 15 Jahren häuften sich Hinweise auf Werte der relativen biologischen Wirksamkeit von Neutronen bei kleiner Dosis, die den Qualitätsfaktor von etwa 10 deutlich überschreiten. Mikrodosimetrische Überlegungen stützten die Annahme, daß die relative biologische Wirksamkeit (RBW) von Neutronen bis zu sehr geringen Dosen umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Neutronendosis ansteigt und zumindestens in einigen Systemen Werte im Bereich 50 bis 100 erreicht (siehe (5)). Es stellte sich daher die Frage, ob ähnlich Werte der RBW sich auch aus Beobachtungen am Menschen ergeben.

Die wichtigsten Daten zur Wirkung relativ geringer Dosen ionisierender Strahlen auf den Menschen beruhen auf den Beobachtungen an den Überlebenden der Atombombenexplosionen. Nach der im Jahre 1965 veröffentlichten Dosimetrie (6) für Hiroshima und Nagasaki sollte die Uranbombe in Hiroshima einen beträchtlichen Anteil schneller Neutronen emittiert haben, während die über Nagasaki abgeworfene Plutoniumbombe, die von Tonnen konventionellen Sprengstoffs umhüllt war, weit weniger Neutronen freisetzte. Quantitative Analysen führten zu dem Schluß, daß der überwiegende Teil der Strahlenschäden in Hiroshima durch die Neutronen verursacht sei, und daß die RBW von Neutronen bei kleinen Dosen stark ansteigt (7,8).

Die von Rossi und Mays abgeleiteten Risikofaktoren für Neutronen, insbesondere für Leukämie, veranlaßten Wissenschaftler am Lawrence Livermore Laboratory (9) die Dosimetrie für Hiroshima und Nagasaki zu überprüfen. Dabei wurden schwerwiegende Mängel der früheren Dosimetrie deutlich. Die endgültige Dosimetrie wurde bisher noch nicht veröffentlicht. Bereits jetzt ist jedoch die wesentliche Aussage möglich, daß die Strahlung auch in Hiroshima nur eine geringe Neutronenkomponente aufwies (10). Es scheint daher nicht mehr möglich, gesicherte Aussagen über die Wirksamkeit kleiner Dosen von Neutronen auf die Beobachtungen an den Überlebenden der Atombombenexplosionen zu stützen.

Angesichts dieser Schwierigkeiten und im Hinblick auf die vermehrten Hinweise aus experimentellen Studien auf hohe Werte der RBW von Neutronen bildeten die beiden Internationalen Radiologischen Kommissionen Jahre 1980 eine Liaisongruppe von ICRP und ICRU, um die Notwendigkeit einer Revision der Qualitätsfaktoren im Strahlenschutz zu prüfen. Der Bericht dieser Gruppe (11) wurde nunmehr vorgelegt. Sein wesentlicher Inhalt wird im folgenden dargestellt.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, daß es sich bei diesem Bericht nicht um Empfehlungen der ICRP oder der ICRU handelt, sondern um eine Arbeitsgrundlage, die die Bemühungen der ICRP unterstützen soll, neue und dann als bindend vorgeschlagene Empfehlungen zu formulieren. Es scheint angebracht, die vorläufigen, vor einigen Jahren veröffentlichten Empfehlungen (12,13) von NCRP (US National Commission for Radiological Protection) und ICRP, die eine summarische Erhöhung der Qualitätsfaktoren für Neutronen um den Faktor 2 zum Inhalt hatten, einstweilen als gegenstandslos zu betrachten.

Bewertung strahlenbiologischer Daten

Der Bericht der Liaisongruppe von ICRP und ICRU befaßt sich eingehend mit den grundlegenden Eigenschaften der im Strahlenschutz benützten Größen und mit den Hypothesen, die ausgesprochen oder unausgesprochen den Versuchen zugrunde liegen, die biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten bei kleinen Dosen durch einfache Zahlenwerte auszudrücken. Insbesondere wird dabei das für Strahlenkarzinogenese ungelöste Problem der Linearität der Dosiswirkungsbeziehung bei kleinen Dosen behandelt. Dieses Problem, das gerade nach dem kürzlichen Reaktorunfall auch in der öffentlichen Diskussion eine zentrale Rolle spielte, kann in einer kurzen Übersicht nicht eingehend erläutert werden. Es ist jedoch

festzustellen, daß Effekte auf 'autonome' Zellen - also vor allem genetische und somatische Mutationen - bei kleinen Dosen mit dosisproportionaler Häufigkeit auftreten, daß es für sie also keine Schwellendosis gibt. Diese wichtige Tatsache folgt aus mikrodosimetrischen Prinzipien (5). Bei kleinen Dosen wird nur ein geringer - der Dosis proportionaler - Bruchteil der Zellen von einem geladenen Teilchen durchquert; die Energiedeposition in den getroffenen Zellen wird dann nur von der Strahlenart, nicht von der Dosis bestimmt.

Für Strahlenkarzinogenese kann Linearität bei kleinen Dosen nicht in ähnlich genereller Weise postuliert werden, da die Entstehung eines Tumors nicht nur von der Anzahl der transformierten Zellen, sondern auch von der geringen Wahrscheinlichkeit der transformierten Zellen sich zu einem Tumor zu entwickeln abhängt. Diese Wahrscheinlichkeit wird durch gewebliche Faktoren beeinflusst, von denen im Prinzip nicht auszuschließen ist, daß sie selbst durch kleine Dosen modifiziert werden.

Für die pragmatischen Zwecke des Strahlenschutzes allerdings geht man nicht nur für Erbschäden sondern auch für Strahlenkarzinogenese von der Annahme linearer Dosisabhängigkeiten bei kleinen Dosen aus. Das Wirkungsverhältnis verschiedener Strahlenarten bei kleinen Dosen ist dann gleich dem Höchstwert der relativen biologischen Wirksamkeit. Die Qualitätsfaktoren sind Schätzungen dieser RBW-Werte für die hauptsächlichsten das Strahlenrisiko bestimmenden Schäden. Die Daten für kleine Dosen sind allerdings unvollständig und teilweise widersprüchlich. Eine Hauptaufgabe der Arbeitsgruppe von ICRP und ICRU war es daher, aus der Synopsis vorhandener Resultate beste Schätzungen zu ermitteln. Man stützte sich dabei vor allem auf eine Analyse von Sinclair (14),

Schätzungen der RBW von Neutronen (Sinclair (14))

Effekt	Geringste Neutronen- dosis /Gy	Ungefähre RBW bei der geringsten Dosis	Schätzung der RBW bei 0.01 Gy relativ zu γ -Strahlung geringer Dosisleistung
Zytogenetische Wirkungen (Mensch, Maus)	0.05	15-25	15-25
Mutation (HGPRT)	0.1	10	30
Transformation	0.025	35-70	35
Tumorinduktion Maus	0.1	40	100
Ratte	0.001	100	50
Lebensverkürzung Akute Bestrahlung	0.05	20	15-30
Fraktioniert	0.2	20	30-60

Tabelle 2

deren wesentliche Schlußfolgerungen für verschiedene experimentelle Systeme in Tabelle 2 dargestellt sind. Trotz großer Unsicherheiten wird deutlich, daß die relative biologische Wirksamkeit von Neutronen im Vergleich zur γ -Strahlung erheblich über den gegenwärtig benützten Qualitätsfaktoren von etwa 10 liegt.

Es fällt auf, daß sich die Studie auf keine menschliche Daten stützen konnte. Für dichtungisierende Strahlen liegen zwar wesentliche epidemiologische Daten vor. Sie beziehen sich jedoch ausschließlich auf Effekte von α -Strahlern, z.B. an den Uranbergleuten (15), an den durch Radium-226 geschädigten Zifferblattmalerinnen, oder an mißbräuchlich mit Radium-224 behandelten Patienten (16). Solche Beobachtungen lassen aber keine direkten Schlüsse auf die relative biologische Wirksamkeit der Strahlung zu, da sie entscheidend abhängen vom komplizierten Verteilungsmuster der Aktivität in den betroffenen Organen, wie Lunge, Knochenoberflächen oder Knochen. Der Verteilungsfaktor ist ein Problem, das im Bericht der Arbeitsgruppe nicht behandelt wurde, und das erst dann gelöst werden muß, wenn man sich nicht nur mit der Äquivalentdosis sondern mit der effektiven Äquivalentdosis befaßt. Dies ist jedoch nicht Gegenstand der Studie.

In Tabelle 3 sind zusammenfassend die von der Arbeitsgruppe der ICRP und ICRU geschätzten RBW-Werte für Neutronen für die verschiedensten experimentellen Systeme nebeneinandergestellt.

Zusammenfassung der RBW-Werte kleiner Dosen von Spaltneutronen oder Neutronen vergleichbarer Energie im Vergleich zu protrahierter oder fraktionierter γ -Bestrahlung

Tumorinduktion	3 - 200
Lebensverkürzung	15 - 45
Transformation	35 - 70
Zytogenetische Wirkungen	40 - 50
Genetische Wirkungen in Säugetieren	10 - 45
Andere Effekte	
Linsentrübung	25 - 200
Mikronuklei	6 - 20
Gewichtsreduktion der Testes	5 - 20

Tabelle 3

Der vorgelegte Bericht befaßt sich eingehend auch mit Daten zur Induktion von Chromosomenaberrationen in menschlichen Lymphozyten. Er stützt sich dabei insbesondere auf die Analyse von Edwards und Mitarbeitern (17). Die Tabelle 4 gibt das wesentliche Resultat wieder, daß auch bei Chromosomenaberrationen das Wirkungsverhältnis dictionisierender Strahlen zu locker ionisierenden Strahlen deutlich über den Werten der gegenwärtig benützten Qualitätsfaktoren liegt.

Chromosomenaberrationen in menschlichen Lymphozyten

Strahlung	RBW relativ zu Co-60 γ -Strahlung
15 MeV Elektronen	0.35
15 MeV Elektronen Pulsbestrahlung	0.6
250 kVp Röntgenstrahlung	3
14.7 MeV Neutronen	17
Zyklotron-Neutronen (E = 7.6 MeV)	30
Cf-252 Neutronen (E = 2.13 MeV)	38
Spaltneutronen (E = 0.9 MeV)	46
Spaltneutronen (E = 0.7 MeV)	53
Pu-239 α -Teilchen	24
Cm-242 α -Teilchen	18

Tabelle 4

Nach den gültigen Empfehlungen nimmt der Qualitätsfaktor seinen Maximalwert bei einem linearen Energietransfer von 175 keV/ μ m an. Der Maximalwert wird auch für beliebig hohe Ionisationsdichten benutzt. Diese vereinfachende Konvention steht im Widerspruch zu der einsichtigen Tatsache, daß bei sehr hohen LET-Werten ein Sättigungseffekt auftreten muss, durch den die Wirksamkeit, beispielsweise schwerer Ionen hoher Ordnungszahl, verringert wird.

Bedeutsam erschien bei der Synopsis experimentaler Daten überdies die sich auch in Tabelle 4 ausdrückende Erkenntnis, daß bei kleinen Dosen Gammastrahlen oder schnelle Elektronen deutlich weniger wirksam sind als konventionelle Röntgenstrahlen. Tabelle 5 führt relevante Beobachtungen auf. Auch diese Erkenntnisse gingen in die vorgelegten Revisionsvorschläge ein.

RBW-Studien bei kleinen Dosen locker ionisierender Strahlen
(Bond et al (18))

Effekt	Strahlung	RBW
Mutationen Tradescantia	Röntgen γ	2.1
Chromosomen- aberrationen in Lymphozyten	Röntgen schnelle Elektronen	3.2
Inaktivierung von Oozyten Maus	Tritium γ	2.9 - 4.2

Tabelle 5

Vorschlag zur Revision der Qualitätsfaktoren

Der Qualitätsfaktor einer Strahlung muß als Funktion einer Größe definiert werden, die die Ionisationsdichte beschreibt. Die konventionelle Bezugsgröße ist LET. Der effektive Qualitätsfaktor einer Strahlung wird durch Integration gemäß Gl.(1) über die LET-Verteilung der geladenen Teilchen erhalten.

Die Größe LET und ihre Verteilungen haben den Vorteil, daß sie für ein bekanntes Strahlenfeld leicht rechnerisch ermittelt werden können. Sie haben den Nachteil, daß sie nicht - oder zumindest nicht ohne zusätzliche Korrekturen - die Energiedeposition in mikroskopischem Volumen angeben. Fluktationen des Energieverlustes, Transport von Energie durch δ -Strahlen und endliche Reichweite sowie Bahnkrümmung der geladenen Teilchen führen zu Abweichungen. Ein schwerer ins Gewicht fallender Nachteil besteht darin, daß LET-Verteilungen für unbekannte Strahlenfelder nicht oder nur unter beträchtlichen Schwierigkeiten gemessen werden können.

Die lineale Energiedichte, y , ist das mikrodosimetrische Analogon von LET. y ist definiert als tatsächlich in einem kugelförmigen mikroskopischen Bereich deponierte Energie geteilt durch zwei Drittel des Durchmessers des Bereiches. Auf eine allgemeinere Definition, die hier nicht benötigt wird, braucht nicht eingegangen zu werden (19). Unter der vereinfachenden Annahme, daß ein geladenes Teilchen seine Energie kontinuierlich entlang einer geraden Linie verliert, ist der Mittelwert der linealen Energiedichte dem LET gleich. In Wirklichkeit ergeben sich wegen der komplizierten Zufallseigenschaften der Bahns Spuren beträchtliche Abweichungen zwischen y und LET. Insbesondere führen die Fluktationen des Energieverlustes (energy loss straggling) dazu, daß die Mittelwerte von y die LET-Werte beträchtlich übertreffen können.

Ein Nachteil der mikrodosimetrischen Größe y besteht darin, daß die Berechnung ihrer Verteilung für ein bekanntes Strahlenfeld komplizierter ist als die Berechnung der LET-Verteilung. Ein erheblicher Vorteil liegt jedoch darin, daß die Verteilung von y auch für unbekannte Strahlenfelder – zumindestens für mikroskopische Bereiche, deren Durchmesser nicht wesentlich kleiner als $1\text{ }\mu\text{m}$ ist – gemessen werden kann.

Ein grundlegender Einwand ist sowohl gegen die Referenzgröße LET als auch y zu erheben. Die biologische Wirksamkeit einer Strahlung wird auch, oder sogar überwiegend, durch Energiekonzentrationen über kleine Bereiche von nur einigen Nanometer oder einigen zehn Nanometern bestimmt. Für das LET-Konzept jedoch – und dies gilt auch, wenn man ein reduziertes LET benutzt – werden die nötigen Korrekturen für kleine Bereiche besonders groß. Die lineale Energiedichte, y , ist zwar auf kleine Bereiche anwendbar, sie ist jedoch mit den heute verfügbaren Methoden nur für größere Bereiche meßbar. Selbst wenn die Verteilungen von y auch für genügend kleine Bereiche meßbar wären, bliebe die Wahl der geeigneten Bereichsgröße problematisch oder sogar prinzipiell unmöglich. Solange jedoch keine besseren Parameter zur Kennzeichnung der räumlichen Korrelation der absorbierten Energie bekannt sind, können sowohl LET als auch y als brauchbare Kenngrößen angesehen werden, die zwar nicht exakt aber für die praktischen Zwecke des Strahlenschutzes ausreichend mit den relevanten Energiekonzentrationen in der bestrahlten Zelle korrelieren.

Die Liaisongruppe von ICRP und ICRU hat sich für die lineale Energiedichte in mikroskopischen Bereichen des Durchmessers $1\text{ }\mu\text{m}$ als Bezugsgröße entschieden. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß sich an dieser Entscheidung heftige Diskussionen entzünden werden, zumal sich gewichtige Argumente für die Beibehaltung von LET als Referenzgröße anführen lassen. Andererseits scheint es, daß der Bezug auf die lineale Energiedichte eher technisches Detail als grundlegende Entscheidung ist. Es ist anzunehmen, daß eine Definition von Q als Funktion der linealen Energiedichte, y , in eine nahezu äquivalente Definition von Q als Funktion von LET umgesetzt werden kann. Jedenfalls erscheint es erstrebenswert, zwei gleichwertige Definitionen zu schaffen, von denen die eine in einfachen Berechnungen verwendbar ist, während die andere für dosimetrische Messungen in unbekannten Strahlenfeldern herangezogen werden kann.

Abb.1 gibt die vorgeschlagene Definition des Qualitätsfaktors als Funktion von y wieder. Wesentlicher Unterschied zur gültigen Definition der Qualitätsfaktoren ist der höhere Maximalwert von ungefähr 30, der bei etwa $y=135\text{ keV}/\mu\text{m}$ erreicht wird. Eine Veränderung ist auch, daß der Qualitätsfaktor bei Werten von y unterhalb $3\text{ keV}/\mu\text{m}$ kleiner als 1 wird. Dies führt zu Qualitätsfaktoren für γ -Strahlung oder schnelle Elektronen, die geringer als 1 sind. Schließlich ergeben sich aus der Definition Qualitätsfaktoren für sehr dicht ionisierende schwere Ionen, die deutlich unterhalb des Maximalwertes liegen.

Die im Bericht der Arbeitsgruppe vorgeschlagene analytische Approximation für die in Abb.1 gegebene Relation ist:

$$Q(y) = 5510/y (1 - \exp(-5 \cdot 10^{-5} y^2 - 2 \cdot 10^{-7} y^3)) \quad (2)$$

wobei y in der Einheit $\text{keV}/\mu\text{m}$ ausgedrückt ist.

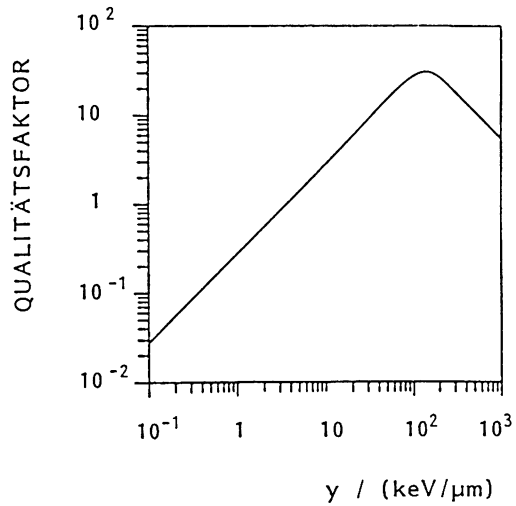


Abb.1 Qualitätsfaktor nach dem Revisionsvorschlag von ICRU-ICRP (11).

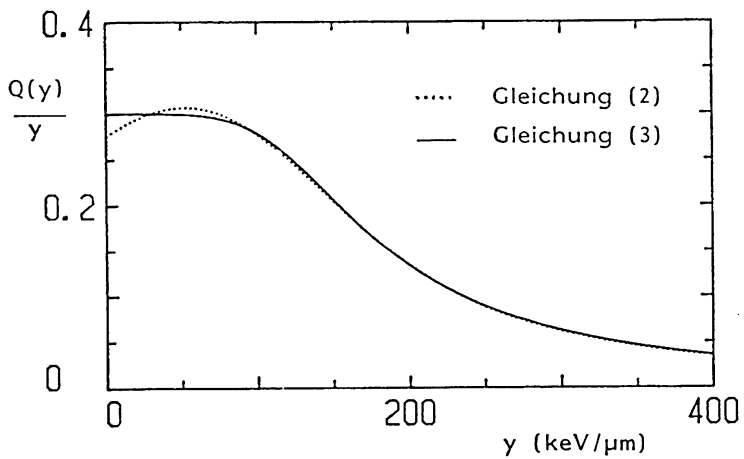


Abb.2 Verhältnis zwischen Qualitätsfaktor und linearer Energiedichte, y , nach Gl.(2) und Gl.(3).

Gleichung (2) ist allerdings unglücklich gewählt, da sie die unerwünschte Eigenschaft hat, von der intendierten Proportionalität des Qualitätsfaktors und der linealen Energiedichte im Anfangsteil der Kurve abzuweichen. Folgende Approximation ist daher vorzuziehen:

$$Q(y) = 0.3 \, y \, (1 + (y/137)^5)^{-0.4} \quad (3)$$

Abb.2 verdeutlicht den geringfügigen Unterschied der beiden Relationen. Gl.(3) hat den Vorteil, daß für locker ionisierende Strahlung der Qualitätsfaktor dem gewichteten Mittelwert, \bar{y}_D , der linearen Energiedichte proportional ist.

Analog zu Gl.(1) wird der Qualitätsfaktor für ein gegebenes Strahlenfeld durch Integration über die Verteilung von y erhalten:

$$Q = \int Q(y) \, d(y) \, dy \quad (4)$$

wo $d(y)$ die gewichtete Verteilung von y ist.

Im Bericht der ICRP-ICRU Liaisongruppe werden die aus der vorgeschlagenen Definition resultierenden effektiven Qualitätsfaktoren für monoenergetische Photonenstrahlung, für monoenergetische Neutronenstrahlung und für α -Teilchen verschiedener Anfangsenergien angegeben. Diese Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Dabei ist allerdings wiederum zu betonen, daß der Qualitätsfaktor für α -Strahlen ohne Berücksichtigung eines Verteilungsfaktors wenig Bedeutung hat.

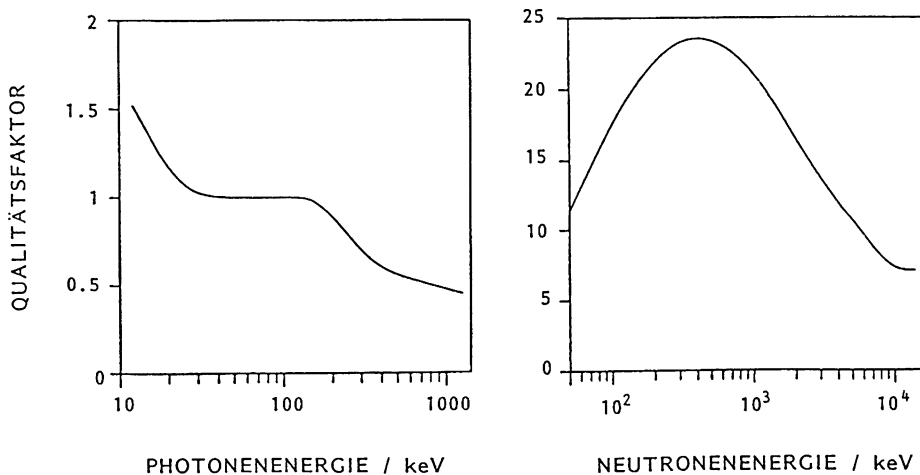


Abb.3 Qualitätsfaktoren für Photonen- und Neutronenstrahlung nach dem Revisionsvorschlag von ICRU-ICRP (11).

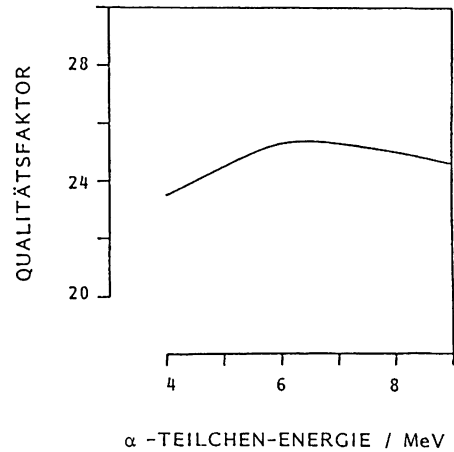


Abb. 4

Qualitätsfaktor für
 α -Strahlen nach dem
 Revisionsvorschlag
 von ICRU-ICRP (11).

Tabelle 6 gibt zulässige Approximationen des Qualitätsfaktors für wichtige Strahlenfelder an. Es ist dabei berücksichtigt, daß für viele Zwecke des Strahlenschutzes keine Unterscheidung der Qualitätsfaktoren für Röntgen- und γ -Strahlung nötig ist. Benützt man für γ -Strahlung oder schnelle Elektronen den Qualitätsfaktor 1, so ist dieser konservative Wert im allgemeinen ausreichend.

Hinreichende Näherungen für den Qualitätsfaktor

Photonen (Röntgen- oder γ -Strahlung) mit Energien über 30 keV	1
Elektronen mit Energien über 30 keV	1
Tritium β -Strahlen	2
Neutronen	25
α -Teilchen	25

Tabelle 6

Abschließende Bemerkungen

Die Problematik der Qualitätsfaktoren wird deutlich in einem breiten Spektrum strahlenbiologischer Erkenntnisse, die - trotz beträchtlicher Unsicherheiten - darauf hinweisen, daß die relative biologische Wirksamkeit dichtionisierender Strahlen bei kleinen Dosen höher ist, als es den gegenwärtig benutzten Qualitätsfaktoren entspricht. Die Strahlenschutzregeln sind also schärfer für locker ionisierende als für dicht-ionisierende Strahlen. Äquivalentdosen locker ionisierender und dicht-ionisierender Strahlen sind nach der gültigen Konvention nicht äquivalent.

Die Unzulänglichkeit der Qualitätsfaktoren gab Anlaß, eine Revision zu erwägen. Zusätzlicher Druck entstand durch die Interimsbeschlüsse der NCRP (12) aus dem Jahre 1980, und der ICRP (13) aus dem Jahre 1985. In diesen Beschlüssen wurde empfohlen, die Qualitätsfaktoren selektiv für Neutronen um den Faktor 2 zu erhöhen. Beide Vorschläge stießen auf Widerspruch, da sie von theoretischem Standpunkt aus als unattraktiv erscheinen. Insbesondere wurde argumentiert, daß ein und dieselben geladenen Teilchen, z.B. Protonen oder Heliumkerne, nicht unterschiedliche Qualitätsfaktoren haben dürften, je nachdem sie als Rückstoßkerne von Neutronen oder durch andere Modalitäten erzeugt seien. Auch an der jede Neutronenstrahlung begleitenden γ -Komponente entzündeten sich Diskussionen über die Konsistenz einer Lösung, die von Qualitätsfaktoren als Funktion des LET ausgeht, dann jedoch schematisch einen Korrekturfaktor für Neutronen anwendet. Sowenig theoretische Überlegungen pragmatischen Festsetzungen für den Strahlenschutz tangieren müßten, zögerte man doch, die Interimsvorschläge von NCRP und ICRP in den gesetzlichen Regelungen zum Strahlenschutz zu verankern. Da die ICRP ihren Vorschlag inzwischen weder bestärkt noch ihn zurückgezogen hat, entstand ein gewisser Entscheidungsdruck, der den Revisionsvorschlägen des Liaisonkomitees zusätzliches Gewicht verleiht.

Auch in der Form seiner Veröffentlichung als 'Bericht einer Arbeitsgruppe von ICRP und ICRU an ICRP und ICRU' ist der Revisionsvorschlag als Arbeitsgrundlage gekennzeichnet, die die künftige Entscheidung der ICRP erleichtern soll. Überdies wird der Vorschlag vergleichende Studien von LET und mikrodosimetrischen Parametern anregen, sowie die Vertiefung relevanter strahlenbiologischer Untersuchungen, wie etwa der Studien zur Zelltransformation durch dichtionisierende Strahlen (20,21). Die Ergebnisse können durchaus noch zu Abweichungen endgültiger Empfehlungen von dem jetzt vorgelegten Konzept führen.

Literatur

- 1) Failla, G. Radium Protection. Radiology XIX, 12-21 (1932).
- 2) Cantril, S.T., Parker, H.M. The Tolerance Dose. U.S. Atomic Energy Commission MDDC-1100 (Technical Information Division, Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tenn.), 1945.
- 3) Taylor, L.S. The Tripartite Conferences on Radiation Protection-Canada, United Kingdom, United States (1949, 1953). Department of Energy NZO/271 (Office of Technical Information, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.), 1984.
- 4) ICRP. International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Brit.J.Radiol., Supp.No.6, London, 1955.
- 5) Kellerer, A.M., Rossi, H.H. The Theory of Dual Radiation Action. In: 'Current Topics in Radiation Research Quarterly', 8, 85-158 (M.Ebert, A.Howard, Eds.) North Holland Amsterdam, 1972.
- 6) Auxier, J.A. Ichiban: Radiation Dosimetry for the Survivors of the Bombings of Hiroshima and Nagasaki. Technical Information Center, ERDA, Oak Ridge, TN, TID-27080, 1977.
- 7) Rossi, H.H., Kellerer, A.M. The Validity of Risk Estimates of Leukemia Incidence Based on Japanese Data. Radiat.Res. 58, 131-140, 1974.
- 8) Rossi, H.H., Mays, C.W. Leukemia risk from neutrons. Health Phys. 34, 353-360, 1978.
- 9) Loewe, W.E., Mendelsohn, E. Revised Dose Estimates at Hiroshima and Nagasaki. Health Physics 41, 663-666, 1981.
- 10) Ellett, W.H., Christy, R.F., Lowder, W.M. A New Dosimetry for A-Bomb Survivors. Radiation Protection Dosimetry, Vol.13, No.1-4, 311-318, 1985.
- 11) ICRU Report 40. The Quality Factor in Radiation Protection. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Md., 1986.
- 12) NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements). Statement on Dose Limits for Neutrons. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Md., 1980.
- 13) ICRP (International Commission on Radiological Protection). Statement from the Paris meeting of the ICRP. Phys.Med.Biol. 30, 863-864, 1985.

- 14) Sinclair, W.K. Fifty years of neutrons in biology and medicine: The comparative effects of neutrons on biological systems. Proc.8th Symp.Microdosimetry (J.Booz, H.G.Ebert, Eds.), 1-54, EUR 8395, Luxembourg, 1983.
- 15) Jacobi, W. Lungenkrebs nach Bestrahlung: Das Radon-Problem. Naturwissenschaften 73, 661-668 (1986).
- 16) Chmelevsky, D., Kellerer, A.M., Spiess, H., Mays, C.W. A Proportional Hazards Analysis of Bone Sarcoma Rates in German 224-Radium Patients. In: 'The Radiobiology of Radium and Thorotrast' (W.Gössner et al., Eds.), 32-37, Urban & Schwarzenberg, München, 1986.
- 17) Edwards, A.A., Lloyd, D.C., Purrott, R.J. Dicentric chromosome aberration yield in human lymphocytes and radiation quality. A resumé including recent results using α -particles. Proc.7th Symp.Microdosimetry, Vol.II, 1263-1273 (J.Booz, H.G.Ebert, H.D.Hartfiel, Eds.) EUR 7147 DE-EN-FR, Harwood Academic Publishers, London-New York, 1981.
- 18) Bond, V.P., Meinhold, C.B., Rossi, H.H. Low dose RBE and Q for x-ray compared to gamma-ray radiations. Health Physics 34, 433-438 (1978).
- 19) ICRU Report 36. Microdosimetry. Internat.Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Maryland 20824, 1983.
- 20) Hill, C.K., Buonaguro, F.M., Myers, C.P., Han, A., Elkind, M.M. Fission-spectrum neutrons at reduced dose rates enhance neoplastic transformation. Nature 298, 67-69, 1982.
- 21) Hill, C.K., Carnes, B.A., Han, A., Elkind, M.M. Neoplastic transformation is enhanced by multiple low doses of fission-spectrum neutrons. Radiat.Res. 102, 404-410, 1985.